

УДК 621.9(075.8)

**В.В. СТУПНИЦЬКИЙ**, д-р техн. наук,**А.М. КУК**, канд. техн. наук, НУ «ЛП», Львів, Україна**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АНАЛІЗУ КОРОЗІЙНОЇ  
СТІЙКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ВИРОБУ З ВРАХУВАННЯМ  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ**

Механізм фреттинг-корозії суттєво залежить від мікротопології та залишкового напружено-деформованого стану спряжених поверхонь. В статті наведена залежність відношення циклічної довговічності виробу на повітрі до довговічності в корозійному середовищі у деталях з попередньо деформованими поверхнями в результаті їх механічного оброблення. Доведено, що в результаті збільшення швидкості різання (більше 150 м/хв) та зменшення подачі (менше 0,1 мм), питома величина деформаційної складової мікронерівності збільшується, що сприяє зменшенню концентрації оксидних продуктів на функціональній поверхні деталі, в результаті чого корозійна стійкість підвищується

**Ключові слова:** фреттинг-корозія, концентрація оксидних продуктів

Механизм фреттинг-коррозии существенно зависит от микротопологии и остаточного напряженно-деформированного состояния сопрягающихся поверхностей. В статье приведена зависимость отношения циклической долговечности изделия на воздухе к долговечности в коррозионной среде в деталях с предварительно деформированными поверхностями в результате их механической обработки. Доказано, что в результате увеличения скорости резания (свыше 150 м/мин) и уменьшения подачи (менее 0,1 мм), удельная величина деформационной составляющей микронеровности увеличивается, что способствует уменьшению концентрации оксидных продуктов на функциональной поверхности детали, в результате чего коррозионная стойкость повышается.

**Ключевые слова:** фреттинг-коррозия, концентрация оксидных продуктов

The mechanism of fretting corrosion substantially depends from the microtopology and residual tensely-deformed state of the conjugate surfaces. In the article dependence of relation of cyclic product life in the wild to product life in a corrosive environment in parts with the preliminary deformed surfaces as a result of their machining is written. It is well-proven that as a result of increase of speed of cutting (over 150 m/min) and reduction of feed (less 0,1 mm), the specific size of deformation component of the roughness increases, that assists reduction of concentration of oxide products on the functional surface of part, corrosion resistance rises as a result.

**Keywords:** fretting corrosion, concentration of oxide products

Експлуатаційні характеристики деталей машин і механізмів визначаються в основному, властивостями поверхневих шарів деталі, оскільки усі процеси руйнування, особливо при циклічному навантаженні починаються, як правило, з поверхні і залежать від її будови і фізико-хімічного стану. Роль характеру недосконалості функціональної поверхні істотно зростає при корозійній втомі, оскільки вона спричинює руйнування захисних бар'єрних плівок, що знижують швидкість корозії за відсутності напружень, а також концентрацією специфічного виду напружень, що

спричиняються пошкодженнями в результаті виникнення на поверхні корозійних каверн.

Щодо впливу технологічних чинників на корозійну стійкість матеріалу, слід окремо розглянути процеси фретинг- та електроємнісної корозії. У кожному з цих процесів прояв мікрогеометричних та залишково-деформаційних чинників створює відповідні умови інтенсивності прояву корозійних явищ при специфічних умовах експлуатації виробів.

Механізм фретинг-корозії достатньо описаний в технічній літературі [1], проте формалізація інтенсивності механіко-хімічних процесів, а особливо їх залежність від мікротопології та залишкового напружено-деформованого стану спряжених поверхонь вивчена недостатньо [1,2]. При спряженні двох поверхонь контакт відбувається не по всій площі, а лише на відносно невеликому числі виступів мікронерівності. В результаті ковзання поверхонь однієї відносно іншої, нерівності однієї поверхні стирають нерівності протилежної і утворюється гладкий слід. У міжповерхневому проміжку адсорбується газ або відбувається окислення спряжених поверхонь. Подальші переміщення мікровиступів руйнують оксидну плівку. Вони можуть також механічно активувати реакцію адсорбції кисню на металі і сприяти утворення оксиду, який, у свою чергу, також стирається. Це і є механізм формування хімічної складової руйнування при фретинг-корозії. Зменшення мікронерівностей профілю внаслідок корозійного зношування формує механічну складову руйнування.

Крім того, деякі вчені [1] вказують також на динамічну складову фретинг-руйнування. Мікрочастинки металу, що відірвалися від суцільної маси виробу, являють собою високоміцні кристали оксиду металу з гострими виступами і виступають в ролі абразивної суспензії при контактній взаємодії рухомих деталей. З іншої сторони, зношування поверхонь сприяє зростанню віддалі між спряженими поверхнями, що, в свою чергу, впливає на те, що низький спочатку електричний опір між поверхнями стає високим. Проте, ця динамічна складова у значній мірі залежить від конструктивного виконання системи змащування і регенерації мастила та потребує додаткового опрацювання.

При протіканні фретинг-корозії з постійною швидкістю показники корозійної стійкості в об'ємному (1) або лінійному (2) еквіваленті визначають по формулах:

$$\tau_m = \frac{\Delta m}{v_m}, \quad (1)$$

$$\tau_l = \frac{\Delta l}{v_l} \quad (2)$$

де  $\tau_m$  - час до зменшення маси на одиницю площі на допустиму величину  $\Delta m$ ;  $v_m$  - швидкість зменшення маси внаслідок фретинг-

корозійного руйнування поверхонь деталі,  $\text{кг/м}^2$ ;  $\tau_l$  - час проникнення фретинг-корозії на допустиму (задану) глибину  $\Delta l$ ;  $v_l$  - лінійна швидкість корозії.

Як і для розрахунку контактних деформацій, необхідно класифікувати мікроспряжені поверхні за геометричною формою у відповідності до форми змодельованих мікронерівностей, отриманих в результаті векторної суми геометрико-кінематичної, вібраційної та деформаційної складової [5]. В даному випадку приймаємо моделювання взаємодії сферичної поверхні і пластичного площинного півпростору, що вирішується за алгоритмом А.Ю. Ішлінського [3]. Крім того, при моделюванні трибоконтакту з урахуванням параметрів мікротопології поверхонь площі мікронконтакту поверхонь повинні бути змінені, приймаючи до уваги необхідність формалізації еквівалентної поверхні у відповідності до моделі Демкина [3,4].

При терті мікровиступи лінійно рухаються по плоскій поверхні металу зі швидкістю  $v$ , причому кожен з них оголяє поверхню чистого металу і проробляє борозну з усередненою глибиною  $(Rpk_{ekv} + Rk_{ekv})$ . Після проходження мікровиступу на зруйнованій поверхні у відбувається швидка адсорбція атмосферного газу, яка з часом супроводжується утворенням тонкої оксидної плівки. Наступний мікровиступ, рухаючись по тій же борозні, знову руйнує і видаляє оксидне нашарування, залишаючи за собою оголений метал. Окислення відбувається за середній час  $t$ . Процес окислення відповідає логарифмічному закону [1]:

$$\Delta m = (Rpk_{ekv} + Rk_{ekv}) \cdot l \cdot k_o \cdot \ln\left(\frac{t}{\tau} + 1\right) \quad (3)$$

де  $k_o$ ,  $\tau$  - константи.

Слід також взяти до уваги, що окисленню передують швидка фізична адсорбція кисню, за якою з меншою швидкістю йде хемосорбція атомів кисню. Хемосорбований кисень, у свою чергу, взаємодіє з металом з утворенням оксиду металу. Ця реакція механічно активується при русі мікронерівностей по поверхні металу. Кількість оксиду, яка утворюється в результаті такого процесу, лімітується хемосорбцією. Швидкість хемосорбції відповідає рівнянню, ідентичному за формою рівнянню (3) [1]. Отже, який би процес не переважав, вид кінцевого виразу залишається по суті однаковим. До цього аргументу можна і не прибигати, оскільки логарифмічний член можна розкласти в ряд і оперувати далі тільки першим членом ряду. Він відповідає лінійній залежності швидкості окислення або адсорбції газу від часу. Лінійна залежність швидкості адсорбції газу вказує, що кількість кисню, присутня на чистій металевій поверхні у вигляді фізично адсорбованого газу,

можна реально контролювати, на відміну від процесу переходу атомів кисню в хемосорбований стан.

Приймаючи до уваги всі чинники фретинг-корозії, можна записати рівняння втрати маси деталі при  $n_{\text{ц}}$  циклах тертя:

$$\Delta m = \left( k_{o1} \cdot \sqrt{N} - k_{o2} \cdot N \right) \cdot \frac{n_{\text{ц}}}{\zeta} + k_{o3} \cdot \eta \cdot n_{\text{ц}} \cdot N \quad (4)$$

де  $k_{o1}, k_{o2}$  - константи, що характеризують фізичну адсорбцію та хемосорбцію атомів кисню [1];

$N$  - навантаження, що визначається як

$$N = K_3 \cdot \alpha \cdot t_m \cdot A_c \cdot B \cdot \varepsilon^{\omega + \nu};$$

$\zeta$  - частота відносних коливань спряжених поверхонь;

$k_{o3}$  - коефіцієнт, що залежить від висоти виступів мікронерівностей профілю ( $R_{p_{\text{ekv}}} + R_{k_{\text{ekv}}}$ );

$\eta$  - відносна площа контакту:

$$\eta = \alpha^{\frac{\omega}{(\nu + \omega)}} \cdot t_m^{\frac{\omega}{(\nu + \omega)}} \cdot q_r^{\frac{\nu}{(\nu + \omega)}} \cdot K_3^{\frac{(\nu + \omega)}{\nu}} \cdot B^{\frac{(\nu + \omega)}{\nu}} \quad (5)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт пружності мікровиступів (можна умовно прийняти  $\alpha=0,5$  у випадку пружного контакту за умови забезпечення критерію Вільямсона-Грінвуда; або  $\alpha=1,0$  у випадку пластичного контакту за умови перевищення індексом пластичності величини 0,5Н) [3, 9];  $t_m$  - відносна опорна довжина по середній лінії профілограми мікронерівностей профілю;  $\nu$  - параметр кривої Аббота;  $q_r$  - питомий контактний тиск;  $B, \omega$  - емпіричні коефіцієнти, що залежать від властивостей матеріалу [9].

Перші два члени правої частини рівняння представляють хімічну складову фретинг-корозії. Ця величина зменшується з підвищенням частоти  $\zeta$ , оскільки при цьому скорочується час протікання хімічної реакції (чи адсорбції) за один цикл. Останній член рівняння представляє механічний чинник, не залежний від частоти, але пропорційний висоті виступів мікронерівностей профілю ( $R_{p_{\text{ekv}}} + R_{k_{\text{ekv}}}$ ) і навантаженню  $N$ . Причому фретинг-руйнування може бути обумовлене більшою мірою як першим, так і другим чинником.

Аналіз впливу технологічних чинників (мікрогеометричних та залишково-деформаційних) на інтенсивність прояву електроемісійних корозійних явищ слід проводити для певних наперед встановлених умов

експлуатації виробів. Розвиток корозійно-втомних пошкоджень функціональних поверхонь носить багатоосередковий характер і ініціюється виникненням на поверхні металу локальних вогнищ корозії на ділянках термодинамічної нестійкості. Вірогідність електроємісійного руйнування при циклічному вантаженні в корозійному середовищі конструкційних матеріалів визначається домінуванням одного з двох протилежних процесів: імовірністю виникнення і збільшення числа дефектів в процесі корозійної втоми електроємісійної природи і зменшення їх внаслідок релаксацийних процесів. Їх спільне вирішення, дозволило встановити залежність відношення циклічної довговічності на повітрі  $N_e$  до довговічності в корозійному середовищі  $N_{ec}$  у деталях з попередньо деформованими в результаті їх механічного оброблення поверхнями:

$$\ln\left(\frac{N_e}{N_{ec}}\right) = t \cdot \left( \frac{k_e^{A_e} \cdot V_e \cdot e^{\frac{z \cdot F \cdot (\phi_0 \pm \Delta\phi_e)}{R \cdot T}} \cdot \Delta\epsilon_a \cdot \omega \cdot t_c}{\Delta m / S} - \zeta \cdot e^{-\frac{U(\sigma)}{k \cdot T}} \right); \quad (6)$$

де  $\Delta\epsilon_a$  - дійсна амплітуда пластичної деформації;  $\Delta m / S$  - показник, що враховує утворення на поверхні металу площею  $S$  (м<sup>2</sup>) оксидних плівок, що збільшують масу на  $\Delta m$  (кг);  $t_c$  - час дії корозії при циклічному вантаженні;

$k_e^{A_e}$  - коефіцієнти концентрації деформації;  $A$  - показник ступеня в рівнянні кривої деформаційного зміцнення при статичному вантаженні (при пластичній деформації, відмінній від рівномірної спостерігається більше посилення електрохімічної гетерогенності матеріалу, анодні процеси локалізуються за місцем концентрації напружень [6]);  $V_e$  - швидкість корозії матеріалу за наявності пластичної деформації (кг/(м<sup>2</sup>×с));  $V_{e0}$  - константа, що визначає початкову швидкість корозії матеріалу [2];  $z$  - валентність металу в іонізованому стані;  $F$  - число Фарадея;  $R$  - універсальна стала;  $T$  - абсолютна температура на поверхні виробу;  $\phi_0$  - стаціонарний електродний потенціал матеріалу в конкретному середовищі (В);  $\Delta\phi_0$  - зміна електродного потенціалу під впливом пластичної деформації металу (В) [6];  $V$  - швидкість релаксацийних процесів, що описується рівнянням Ареніуса [2];  $\zeta$  - частотна характеристика матеріалу за рівнянням Ареніуса;  $U(\sigma)$  - енергія активації процесу релаксації, залежна від напруження [2];  $k$  - стала Больцмана ( $k \sim 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К).

Результати вивчення кінетики корозії металу в повітрі як в стійкому середовищі часто беруться за основу розробки і перевірки інженерних методів розрахунку корозійної стійкості матеріалів. Щодо корозійної стійкості оброблених поверхонь деталей, на основі аналізу реологічного моделювання технологічних переходів, можна зробити такі висновки:

1. В результаті збільшення швидкості різання (більше 150 м/хв) та зменшення подачі (менше 0,1 мм), питома величина деформаційної складової мікронерівності збільшується, що сприяє утворенню мікрорельєфу з значними значеннями глибини мікровпадін Rvk. Це спричинює зменшення концентрації оксидних продуктів на функціональній поверхні деталі, в результаті чого корозійна стійкість підвищується.

2. Підвищенню корозійної стійкості механічно-оброблених поверхонь деталей сприятиме ефект вибіркового переносу матеріалу спряжених поверхонь як результат самовільного утворення в зоні контакту пасивованої (без окислів) тонкої плівки з низьким опором зсуву, не здатної наклепуватись при терті, що може багаторазово деформуватись без руйнування. При цьому продукти зношування переходять з одної спряженої поверхню на іншу і утримуються в зоні трибоконтакту. Формування зони пластичної деформації визначається на основі функціонування модуля MicroCAE в складі CAF-системи [7].

3. З іншої сторони, неоднорідний характер пластичної деформації в зоні різання, призводить до різниці потенціалів між неоднаково-деформованими кристалами, тобто до утворення маси гальванічних пар, що є причиною зменшення корозійної стійкості оброблюваного матеріалу заготовки. Дослідження реологічної картини залишкових напружень II роду при механічному обробленні матеріалу присвячені дослідження описані в [8]. Формування зон неоднорідності фазових структур оброблюваного матеріалу заготовки визначається на основі функціонування модулю NanoCAE в складі CAF-системи.

**Список використаних джерел:** 1. Улиг Г.Г. Коррозия и борьба с ней / Г.Г.Улиг, Р.У.Реві. Под ред. А. М. Сухотина. — Л.: Химия, 1989. - 456 с. 2. Семенова И.В. Коррозия и защита от коррозии / И.В.Семенова, Г.М.Флорианович, А.В.Хорошилов. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. - 336 с. 3. Демкин Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б.Демкин, Э.В.Рыжов. - М.: Машиностроение, 1981.- 224 с. 4. Ступницький В.В. Проектування функціонально-орієнтованих технологій механічного оброблення деталей засобами паралельного інжинірингу / В.В.Ступницький // Вісник Донецького національного технічного університету «Прогресивні технології і системи машинобудування». - 2013.- Вип.1 (45). - 2 (46).- с. 249-256. 5. Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей / А.Г.Суслов. - М.: Машиностроение, 2008. - 330 с. 6. Пачурин Г.В. Теоретические основы повышения коррозионной долговечности упрочненных металлов и сплавов / Г.В.Пачурин // успехи современного естествознания. - М.: №2.- 2011.- с. 95-99. 7. Ступницький В.В. Використання САФ-системи як основи формування функціонально-орієнтованих технологій машинобудівного виробництва / В.В.Ступницький // Вісник НУ "Львівська політехніка" "Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні". - 2012.- №746.- с. 40-45. 8. Ступницький В.В. Визначення деформаційної складової параметру шорсткості із застосування методів реологічного імітаційного моделювання процесу різання / В.В.Ступницький // Машинознавство. — 2013. — №7-8 (193-194).- С.45-48. 9. Мышкин Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н.К.Мышкин, М.И.Петроковец. - М.: Физматлит, 2007. - 368 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Ulig G.G. Korrozija i bor'ba s nej / G.G.Ulig, R.U.Revi. Pod red. A. M. Suhotina. — L.: Himija, 1989. 456 s. 2. Semenova I.V. Korrozija i zashhita ot korrozii / I.V.Semenova, G.M.Florianovich, A.V.Horoshilov. — M.: FIZMATLIT, 2002. - 336 s. 3. Demkin N.B. Kachestvo poverhnosti i kontakt detalej mashin / N.B.Demkin, Je.V.Ryzhov. M.: Mashinostroenie, 1981. 224 s. 4. Stupnic'kij V.V. Proektuvannja funkcional'no-orientovanih tehnologij mehanichnogo

obroblennja detalej zasobami paralel'nogo inzhiniringu / V.V.Stupnic'kij // Visnik Donec'kogo nacional'nogo tehničnogo universitetu «Progresivni tehnologii i sistemi mashinobuduvannja». 2013. Vip.1 (45). – 2 (46). s. 249-256. 5. Suslov A.G. Inzhenerija poverhnosti detalej / A.G.Suslov. M.: Mashinostroenie, 2008. – 320 s. 6. Pachurin G.V. Teoreticheskie osnovy povysšenija korrozionnoj dolgovechnosti uprochnennyh metallov i splavov / G.V.Pachurin // uspehi sovremennogo estestvoznanija.- M.: №2. 2011. c.95-99. 7. Stupnic'kij V.V. Viktoristannja CAF-sistemi jak osnovi formuvannja funkcional'no-orientovanih tehnologij mashinobudivnogo virobništva / V.V.Stupnic'kij // Visnik NŮ “L'vivs'ka politehnika” “Optimizacija virobnychih procesiv i tehničnij kontrol' v mashinobuduvanni i priladobuduvanni”. 2012. №746. s. 40-45. 8. Stupnic'kij V.V. Viznachennja deformacijnoi skladovoi parametru shorstkosti iz zastosuvannja metodiv reologichnogo imitacijnogo modeljuvannja procesu rizannja / V.V.Stupnic'kij // Mashinoznavstvo. — 2013. — №7-8 (193-194). S.45-48. 9. Myshkin N.K. Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i tehničeskie prilozhenija tribologii / N.K.Myshkin, M.I.Petrokovec. M.: Fizmatlit, 2007. – 368 s.